

# Thermodynamik

„technische Grundlagen“

by Timo

# Struktur

- ❖ **Was ist Thermodynamik**
- ❖ **Geschichte**
- ❖ **Einstieg Thermodynamik**
- ❖ **Thermische Zustandsgrößen**
- ❖ **Thermische Zustandsgleichungen**
- ❖ **Thermodynamische Systeme**
- ❖ **Zustand und Prozess**
- ❖ **Hauptsätze**

# Was ist überhaupt Thermodynamik?

---

Das Wort Thermodynamik kommt aus dem Griechischen von **therme** (Wärme) und **dynamis** (Kraft).

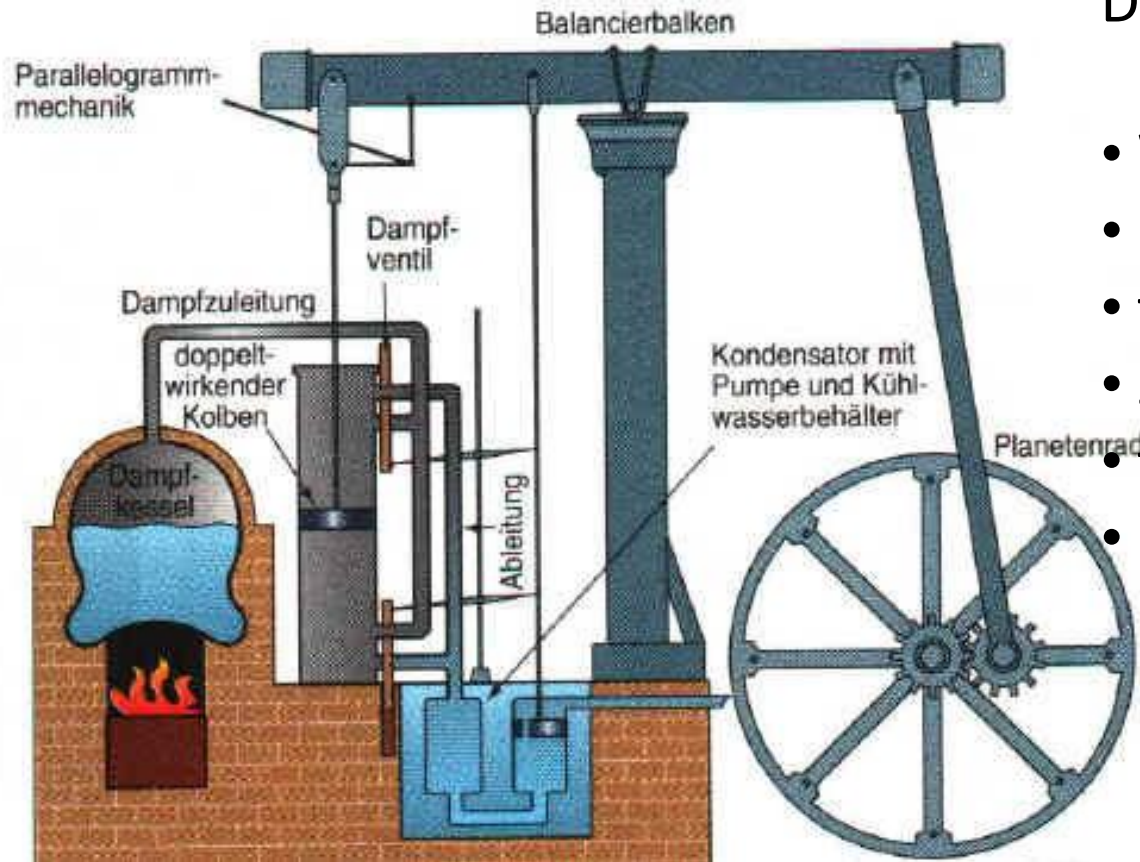
# Aufgabe der Thermodynamik

---

die Entwicklung von Verfahren zum Beschreiben

- der Energieumwandlung und
- der Energieübertragung

# Beispiel der Thermodynamik



Dampfmaschine:

- Wasser wird erhitzt
- Dampf steigt
- treibt den Kolben an
- setzt die Mechanik in gang
- treibt die Pumpe an
- .....

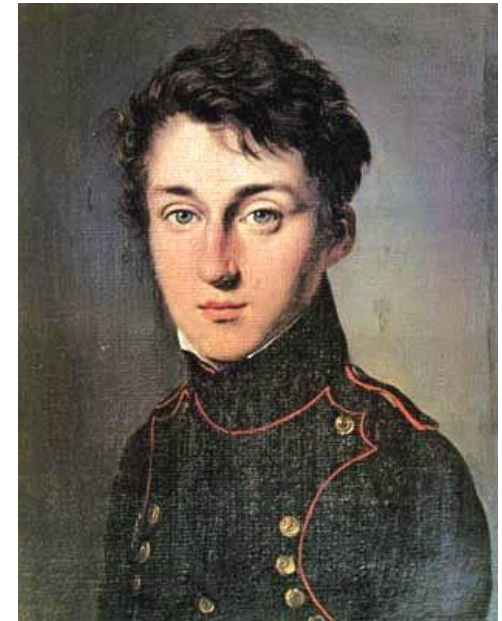
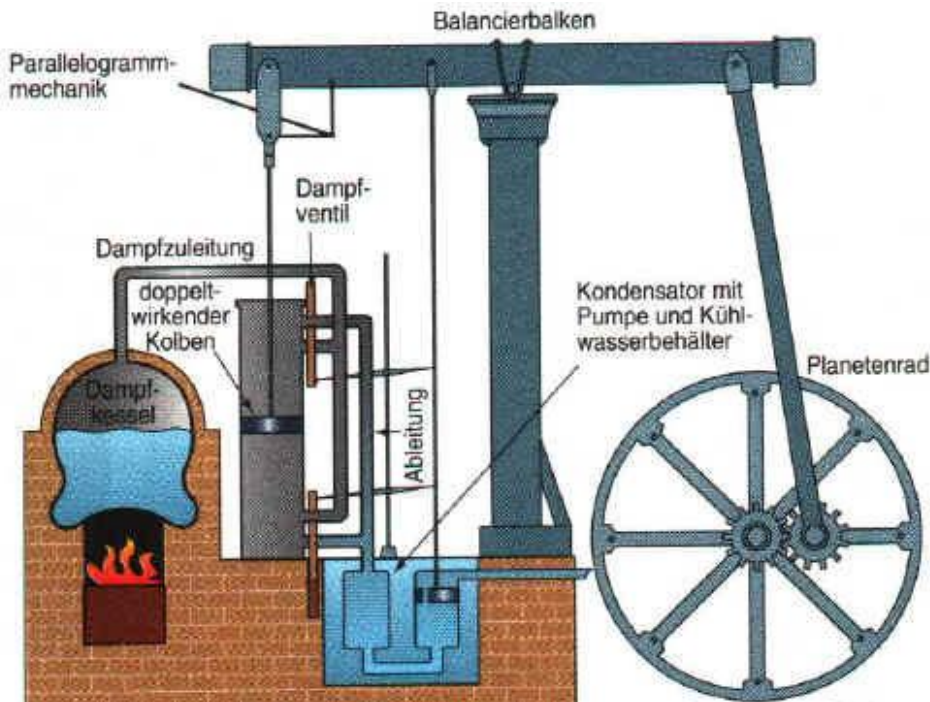
# Geschichte Thermodynamik

# Geschichte der Thermodynamik



**Im 17. Jahrhundert legte das Thermometer den Grundstein für die Wärmelehre bzw. Thermodynamik.**

# Geschichte der Thermodynamik



1824 untersuchte der französische Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot die Vorgänge in einer Dampfmaschine.



# Geschichte der Thermodynamik



Abb. 4 Ludwig Boltzmann

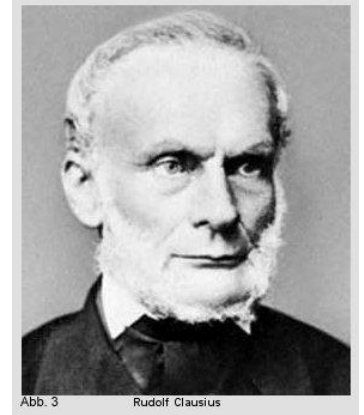


Abb. 3 Rudolf Clausius

Ca. 1906 standen die **4 Hauptsätze**, die Grundlagen der Thermodynamik fest.

# Übersicht Hauptsätze

- 0. Hauptsatz:** Stehen zwei Systeme jeweils mit einem dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht.
- 1. Hauptsatz:** Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Energiearten umgewandelt werden.
- 2. Hauptsatz:** Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar.
- 3. Hauptsatz:** Der absolute Nullpunkt der Temperatur ist unerreichbar.

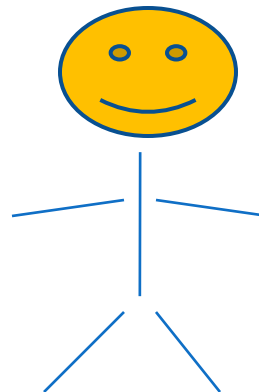
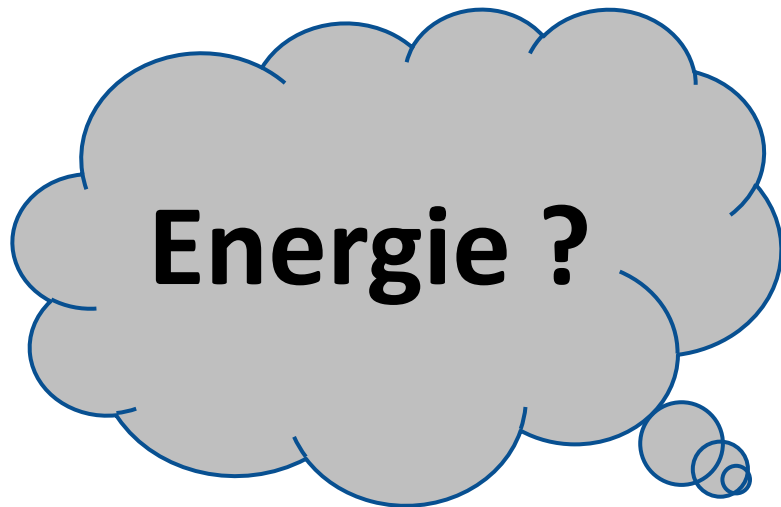
# Einstieg Thermodynamik

„technische Grundlagen“

# Definition Thermodynamik

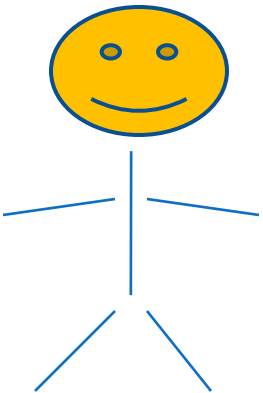
Thermodynamik ist die Lehre der Energie,  
ihrer Erscheinungsformen und Fähigkeit,  
Arbeit zu verrichten.

# Arbeit ? / Energie ?

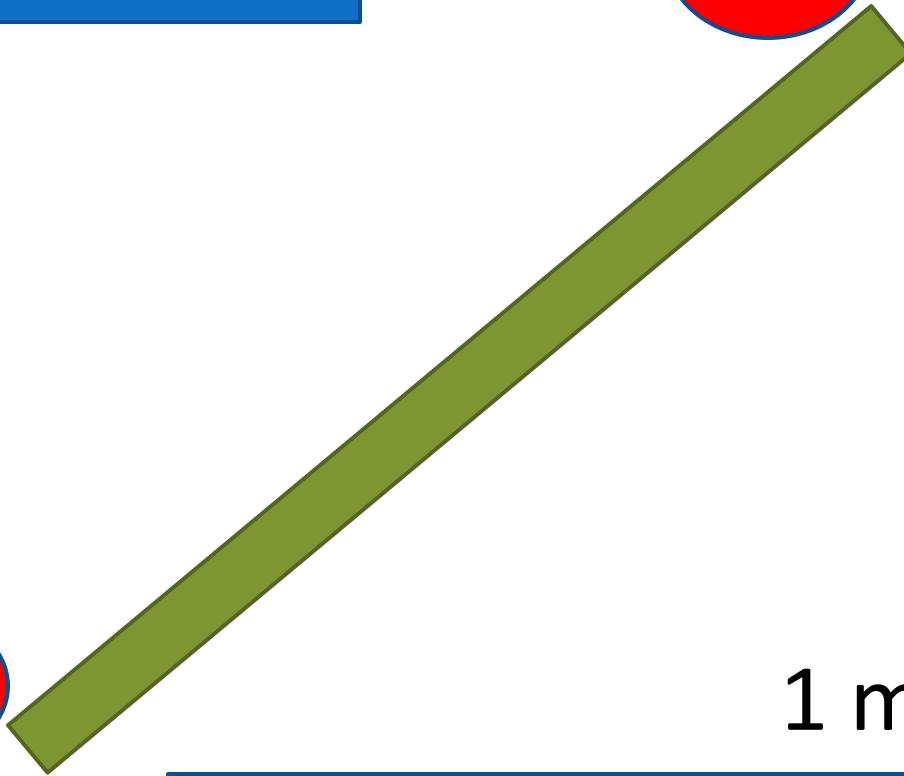


# Arbeit / Energie

Energie = gespeicherte  
Arbeit



1



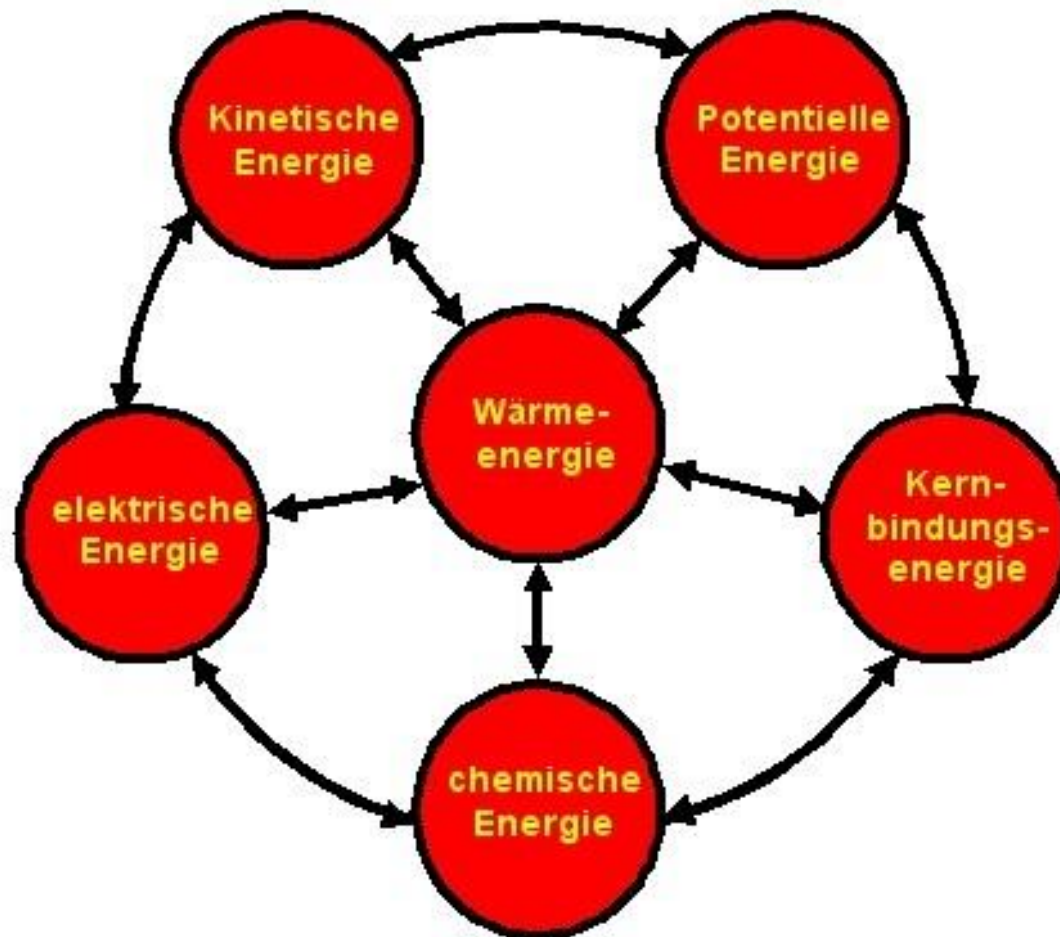
20

20 m Höhe

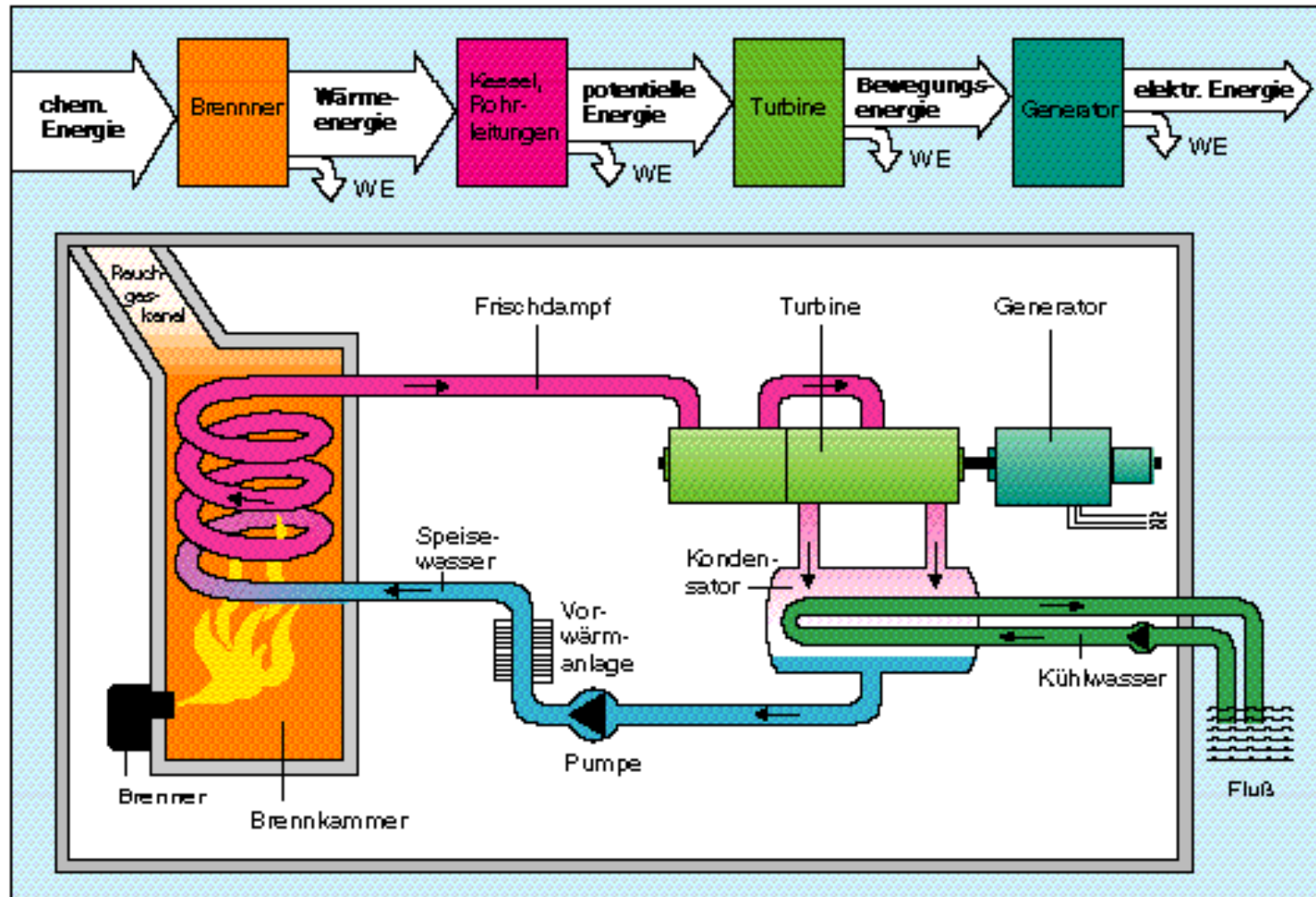
1 m Höhe



# Arten der Energie



# Beispiele der Thermodynamik





# Thermische Zustandsgrößen

# Thermische Zustandsgrößen

Die Eigenschaften eines Stoffes werden durch physikalische Größen beschrieben:

Druck =  $p$

Volumen =  $V$

Temperatur =  $T$

# Thermische

# Zustandsgleichungen

# Thermische Zustandsgleichung

---

Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen **Druck**, **Volumen** und **Temperatur**.

# Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$p$  = Druck (Pa)

$V$  = Volumen ( $\text{m}^3$ )

$n$  = Stoffmenge (mol)

$R$  = die allgemeine Gaskonstante

$T$  = Temperatur (K)

# Allgemeine Zustandsgleichung der Gase

Bei einem (idealen) Gas bleibt trotz Änderung eines oder mehrerer dieser Zustände (Druck  $p$ , Temperatur  $T$  und Volumen  $V$ ) der Quotient  $p \cdot V/T$  konstant, es gilt:

$$\frac{V_1 \cdot p_1}{T_1} = \frac{V_2 \cdot p_2}{T_2}$$

Diese **Allgemeine Zustandsgleichung der Gase** ermöglicht, die Veränderungen eines Gases, z. B. Wärmeausdehnung rechnerisch vorherzusagen.

# Beispielaufgabe

$$\frac{V_1 \cdot p_1}{T_1} = \frac{V_2 \cdot p_2}{T_2}$$

**Beispiel:** Eine 10-Liter-Heliumflasche ist mit einem Überdruck von 200 bar befüllt.

Wieviel 1-Liter-Luftballons können damit befüllt werden?

geg.:  $V_1 = 10 \text{ L}$  ;  $p_1 = 200 \text{ bar}$  ;  $p_2 = 1 \text{ bar}$  ;  $T = \text{konst.}$

ges.:  $V_2 = ?$

Mit  $T = \text{konst.}$  ergibt sich:  $V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2$

Auflösen:  $V_2 = V_1 \cdot p_1 / p_2$

Einsetzen:  $V_2 = 10 \text{ L} \cdot 200 \text{ bar} / 1 \text{ bar}$

Lösung:  $V_2 = 2.000 \text{ L}$

Antwort: Mit der Heliumflasche können 2.000 Ballons zu je einem Liter befüllt werden.

# Eure Aufgabe

Ein Gasometer mit  $10\text{m}^3$  Volumen ist bei 5bar Überdruck mit Erdgas gefüllt. Nun werden die  $10\text{m}^3$  Erdgas in ein neues Gasometer mit 7,6bar Überdruck gepumpt. Wie groß ist das neue Gasometer?

Geg.  $V_1 = 10\text{m}^3$ ,  $p_1 = 5\text{bar}$ ,  $p_2 = 7,6\text{bar}$  die Temperatur bleibt konstant  
Ges.  $V_2$

Ansatz:  $V_1 \times p_1 = V_2 \times p_2$


also umstellen nach  $V_2$ ,  $V_2 = V_1 \times p_1 / p_2$

$$10\text{m}^3 \times 5\text{bar} / 7,6\text{bar} = 6,58\text{m}^3$$

Das neue Gasometer hat ein Volumen von ca.  $6,58\text{m}^3$ .



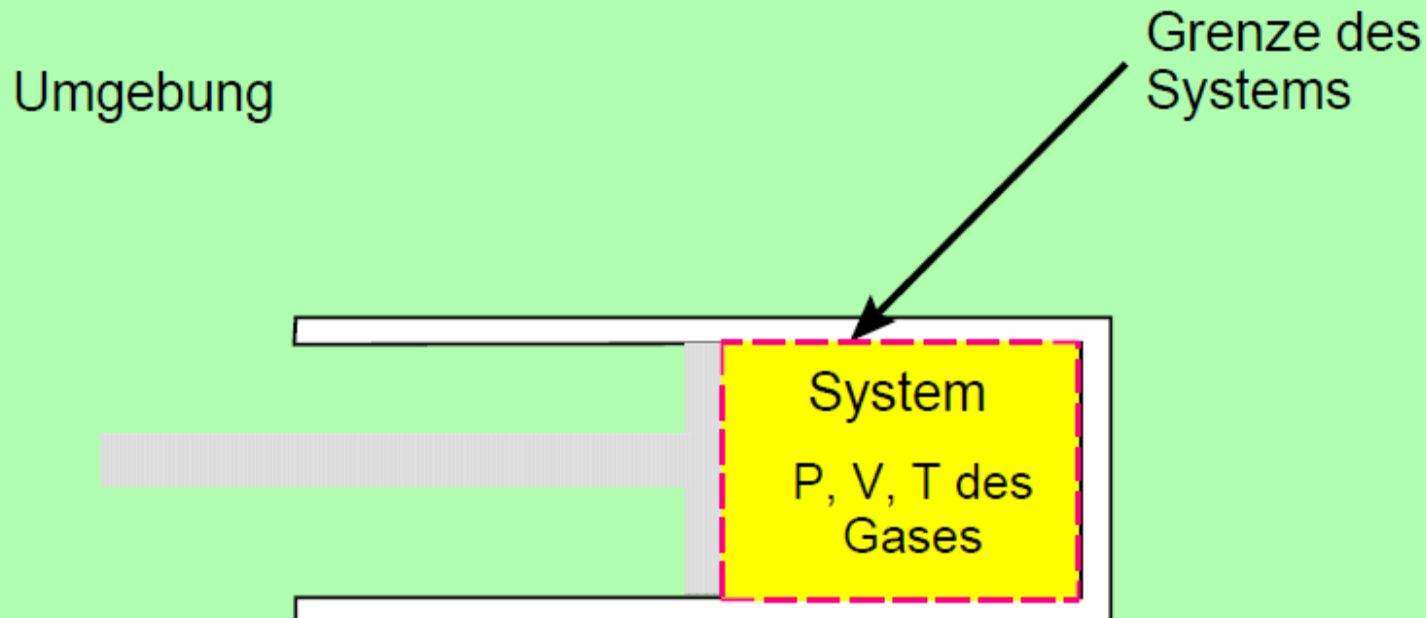
# Thermodynamische Systeme



**Aber erst einmal die Frage was  
ist überhaupt ein System?**

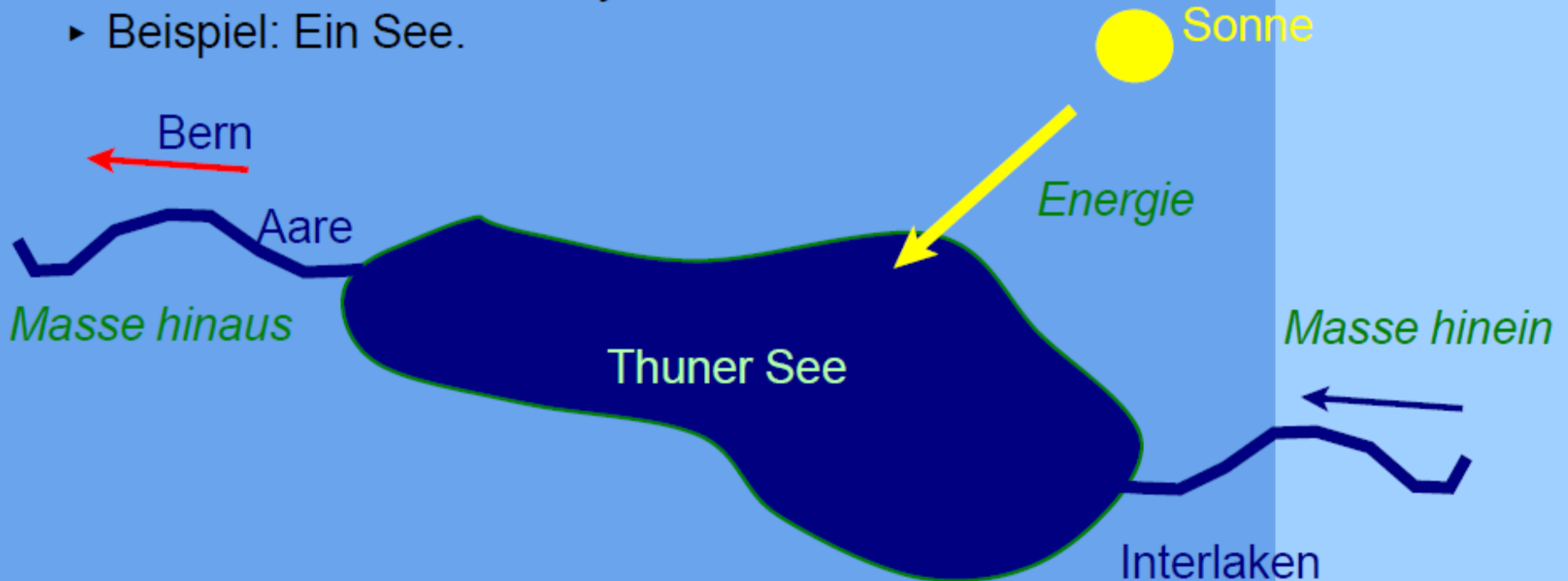
# Ein typisches thermodynamisches System

- Das System sei ein Gas in einem Zylinder.
- Der Zylinder, das Zubehör zur Überwachung des Gases und der Kolben sind alle Teil der “Umgebung”

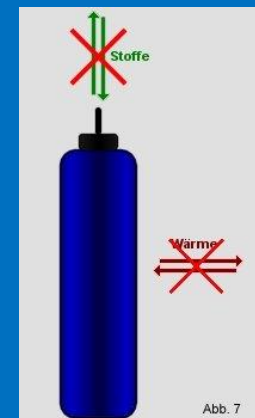
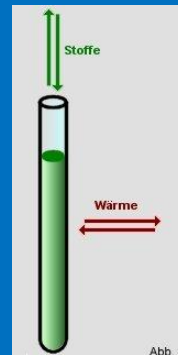
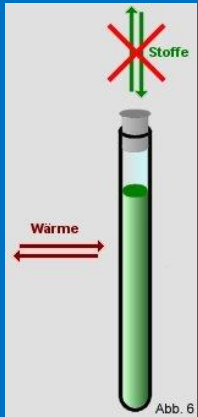


# Was die Umgebung bewirken kann

- Grundsätzlich kann die Umgebung Energie für das System bereitstellen oder von ihm empfangen.
- Sie kann ebenso dem System Materie zuführen oder entziehen.
  - Beispiel: Ein See.



# Systeme der Thermodynamik



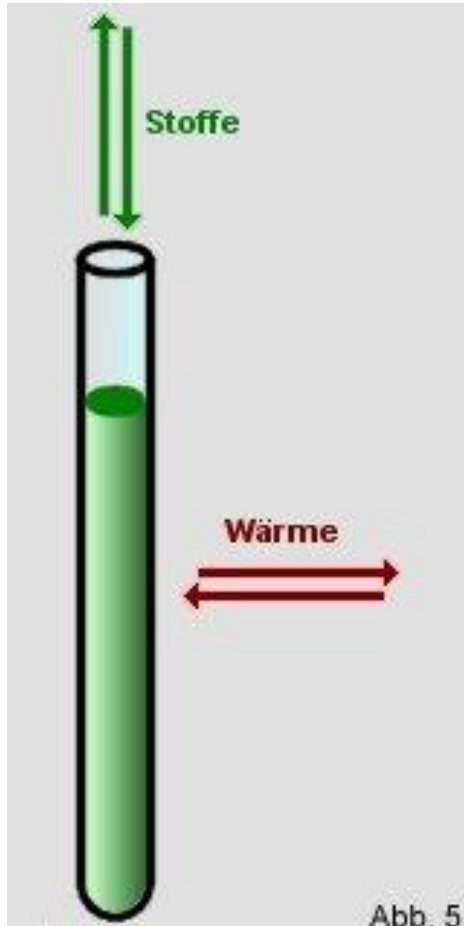
# Systeme der Thermodynamik

- Festlegung des Systems
- Messung der Variablen Druck-, Temperatur- und Volumen

**daher 3 verschiedene Systemarten**



# offenes System

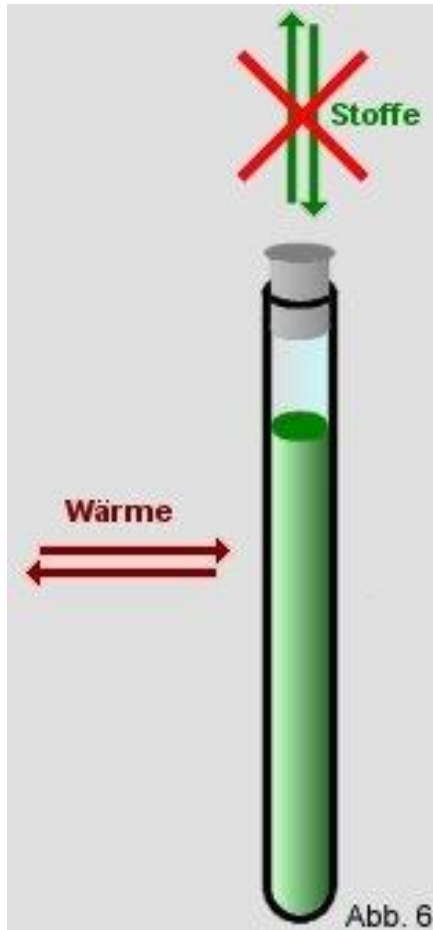


System: offen

Beispiel: Reagenzglas

Thermo: - Stoffaustausch möglich  
- Energieaustausch möglich  
(z.B. Wärme)

# geschlossenes System



System: geschlossen

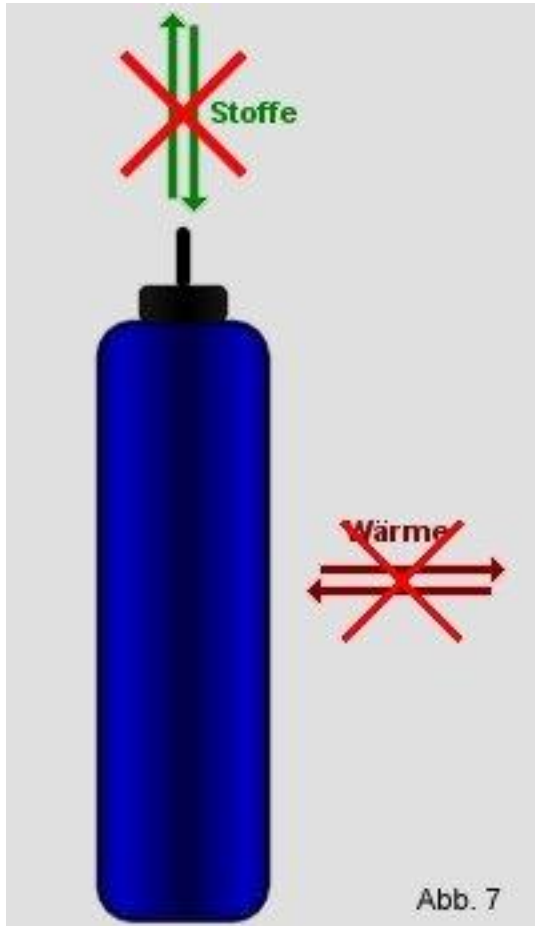
Beispiel: Reagenzglas + Stöpsel

Thermo:

- Stoffaustausch mit der Umgebung nicht möglich
- Energieaustausch möglich (z.B. Wärme)



# isoliertes System



System: isoliert

Beispiel: Thermoskanne

Thermo:

- Stoffaustausch nicht möglich
- Energieaustausch nicht möglich (z.B. Wärme)

# Was fangen wir nun damit an?

---

Die Aufgabe der Thermodynamik ist nun:

1. den Zustand im inneren des Systemes zu beschreiben
2. den Energieaustausch zwischen dem System und der Umgebung zu beschreiben

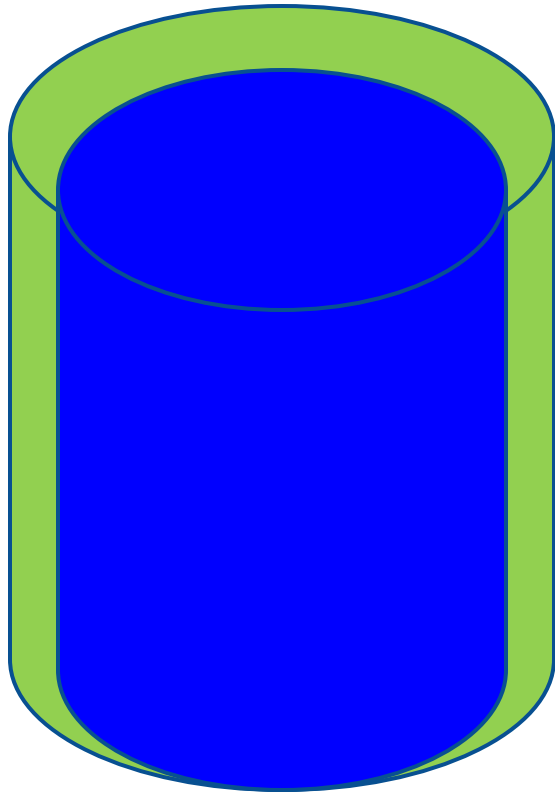
# Wie beschreibe ich nun diese Vorgänge?

---

Zustand

Prozess

# Zustand



Regentonne

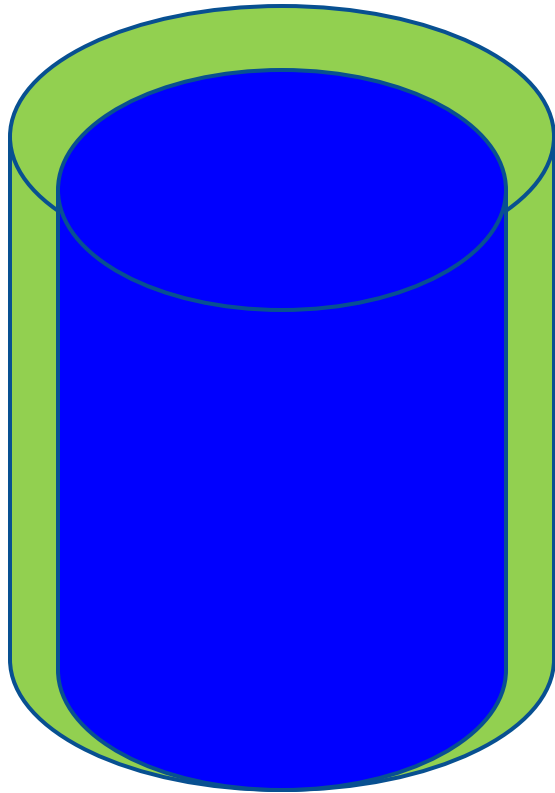
Das Wasser in der Regentonne befindet sich in einem thermodynamischen Zustand.

Dieser wird mit Hilfe der Zustandsgrößen beschrieben:

- Druck
- Temperatur
- Volumen
- Masse

Ein Zustand ist eine Momentaufnahme des Systems!

# Gleichgewichtszustand



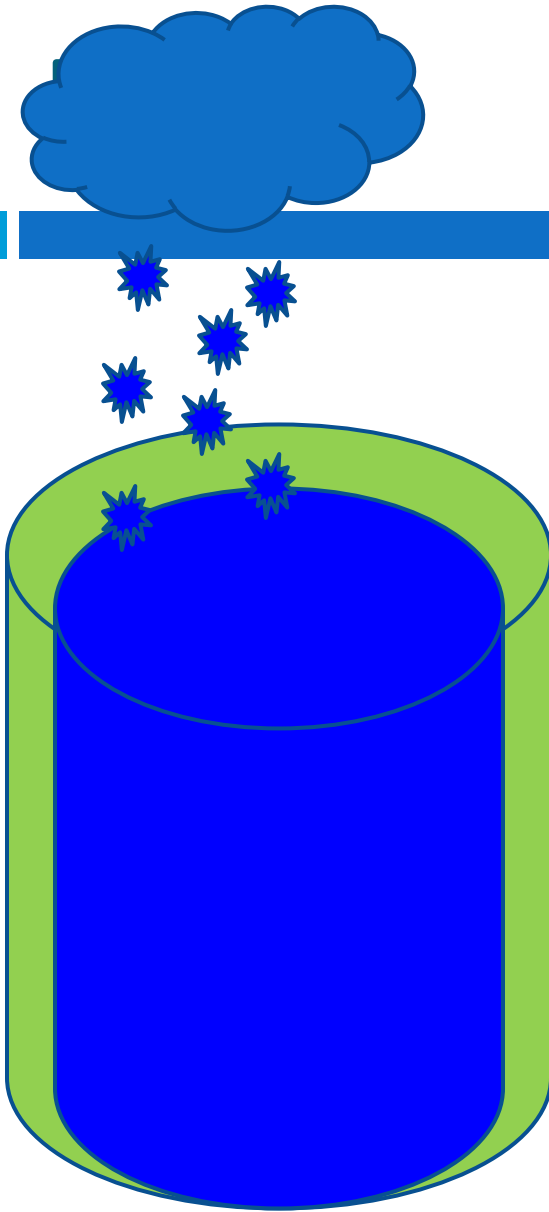
Regentonne

Der thermodynamische Gleichgewichtszustand ist besonders zu betrachten.

In diesem Fall ist das System im Gleichgewicht.

z.B. es läuft soviel Masse hinein und heraus

# Prozess



Regentonne

Es regnet, weiteres Wasser kommt in die Tonne, damit ins System, das ist ein Prozess!

Prozesse oder auch Vorgänge verändern die Zustände im System.

# Beispiel Prozess / Zustand

Girokonto mit 1000€ = Zustand

Überweisung von 500€ = Prozess

Es geht nicht verloren wird nur  
übereignet!

# Prozessgrößen

---



Wärme

Arbeit

Sie treten an der Systemgrenze auf.



# Merksätze

„ So wie ein Zustand durch Zustandsgrößen beschrieben wird, so wird ein Prozess durch Prozessgrößen beschrieben.“

„ So wie zwischen 2 Punkten ein Satz steht, so steht ein thermodynamischer Prozess zwischen zwei Zuständen.“

# Hauptsätze

## „die Gesetze“

# Hauptsätze der Thermodynamik

**0. Hauptsatz**

**1. Hauptsatz**

**2. Hauptsatz**

**3. Hauptsatz**

# 0. Hauptsatz

# 0. Hauptsatz

## GESETZ DES THERMISCHEN GLEICHGEWICHES

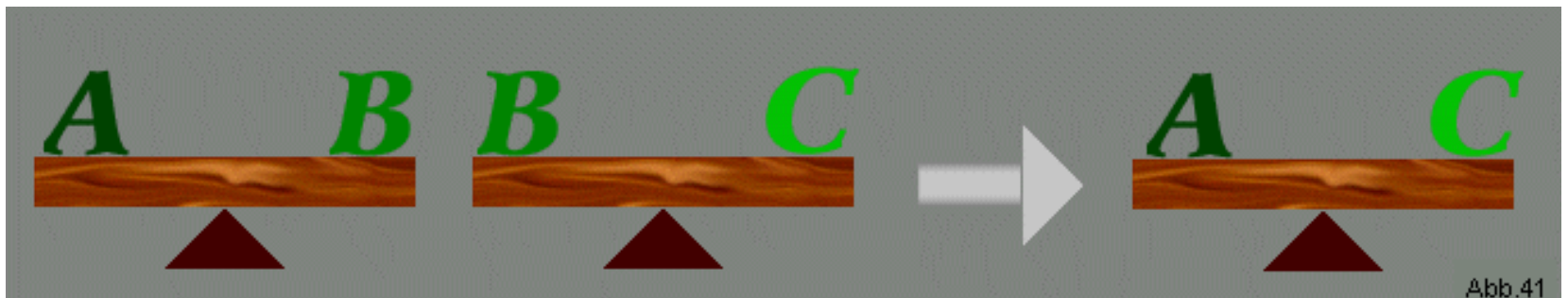


Abb.41

# GESETZ DES THERMISCHEN GLEICHGEWICHES

**Es steht das System A mit dem System B in thermischem Gleichgewicht. Das System B steht auch mit System C im thermischen Gleichgewicht. Daraus folgt, daß auch die beiden Systeme A und C miteinander im thermischen Gleichgewicht stehen müssen.**

# 1. Hauptsatz

# ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

***Energie kann weder erzeugt noch vernichtet,  
sondern nur in andere Energiearten  
umgewandelt werden.***



# ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

Start Video

Video auf Youtube

Notiz: Das Video befasst sich mit dem ersten Hauptsatz!

# ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

$$\frac{dE_{\text{sys}}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{W}_{t,j} + \sum_e \dot{m}_e \cdot \left( h_e + g \cdot z_e + \frac{1}{2} c_e^2 \right) - \sum_a \dot{m}_a \cdot \left( h_a + g \cdot z_a + \frac{1}{2} c_a^2 \right)$$

- $\frac{dE_{\text{sys}}}{dt}$ : die zeitliche Änderung des Energieinhalts im System (Energieinhalt = innere Energie + kinetische Energie + potentielle Energie).
- $\dot{Q}_i$ : der **Wärmestrom** über die Systemgrenze.
- $\dot{W}_{t,j}$ : der Arbeitsstrom (**technische Arbeit**) über die Systemgrenze.
- $\dot{m}_e$ : der **Massenstrom** in das System.
- $\dot{m}_a$ : der Massenstrom aus dem System
- $h$ : die **spezifische Enthalpie**
- $g \cdot z$ : die spezifische **potentielle Energie** (mit  $z$  = Höhe über dem Bezugsniveau und  $g$  = **Schwerebeschleunigung**)
- $\frac{1}{2} c^2$ : die spezifische **kinetische Energie** (mit  $c$  = Geschwindigkeit).

# ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

Für ein System lassen sich unterscheiden:

gespeicherte Energie

- potentielle
- kinetische
- innere

transportierte Energie

- Arbeit
- Wärme



***Nun ziehen wir Energiebilanz an einem Kraftwerk!***

# Energiebilanz eines Kraftwerkes

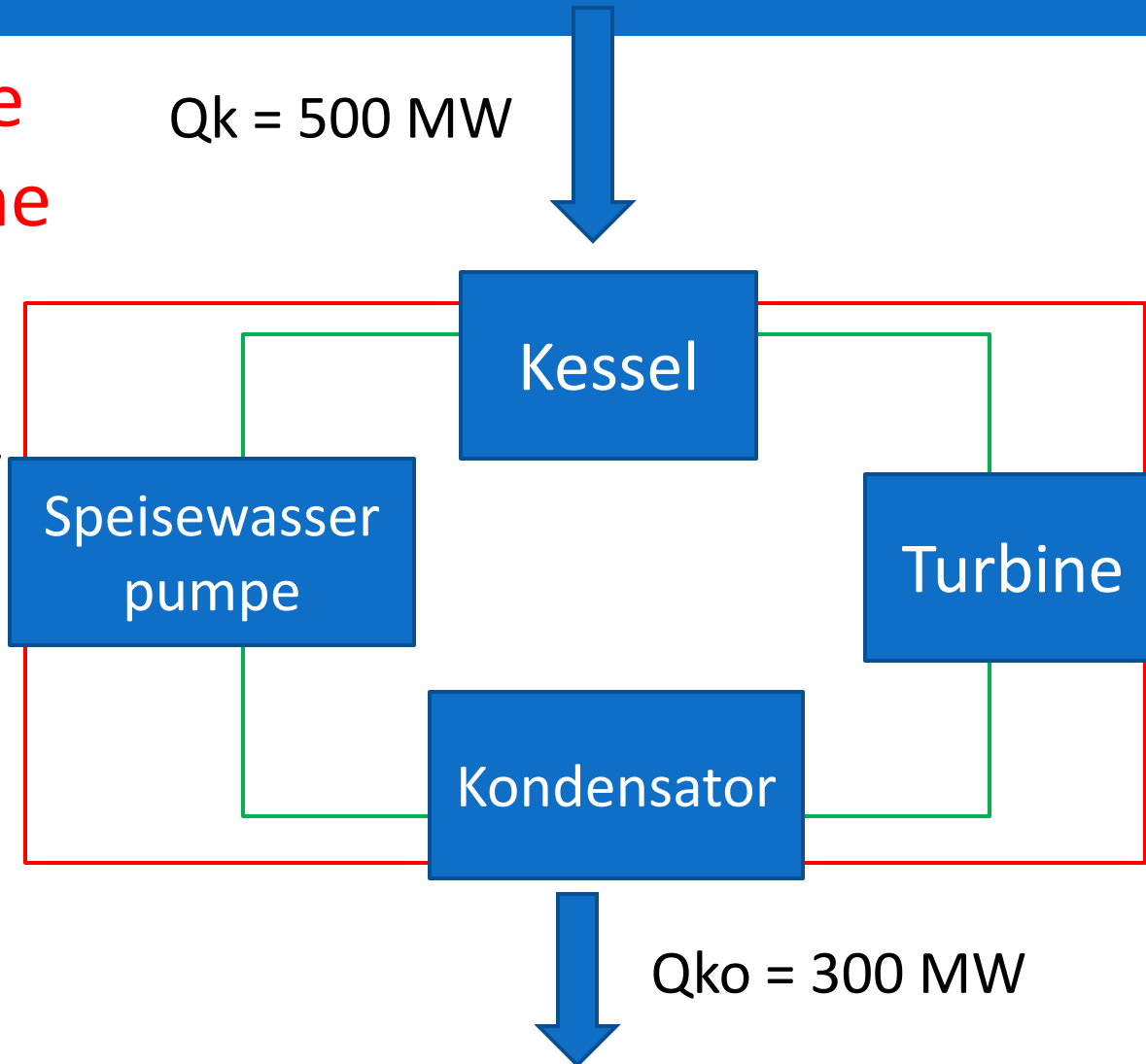


# Energiebilanz eines Kraftwerkes

Aufgabe  
errechne  
PT!

$Q_k = 500 \text{ MW}$

$P_{sp} = 10 \text{ MW}$



Und hier?  
Rein oder  
Raus?

PT = ?



# Energiebilanz eines Kraftwerkes

$$\text{System} = 0 = Q_k - Q_{ko} + P_{sp} + P_T$$

Die Lösung wäre:

$$Q_k = 500 \text{ MW}$$

$$0 = 500 \text{ MW} - 300 \text{ MW} + 10 \text{ MW} + P_T$$

$$P_{sp} = 10 \text{ MW}$$

$$P_T = \underline{\underline{-210 \text{ MW}}}$$

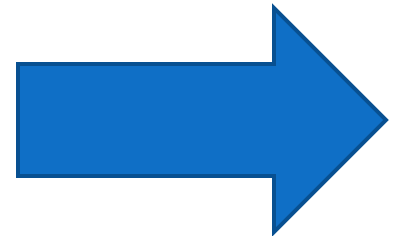
$$Q_{ko} = 300 \text{ MW}$$

Also verlassen die Turbine 210 MW, die dann zur Verfügung stehen.

$$P_T = ?$$

# Ergänzung

---





# 2. Hauptsatz

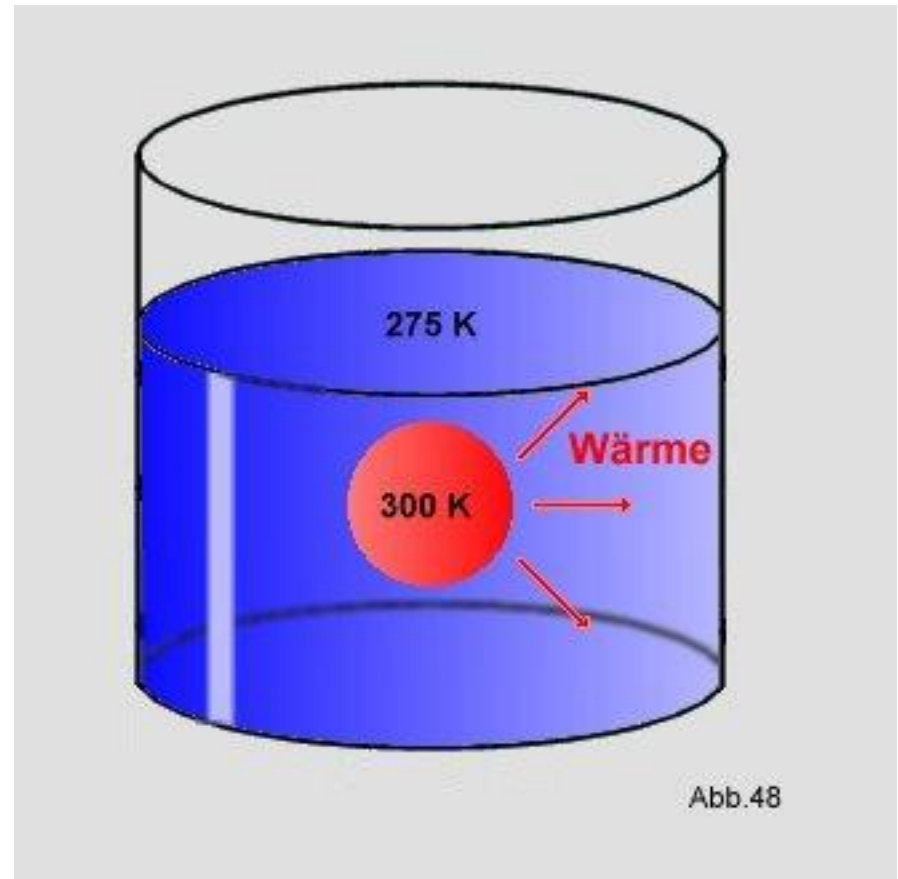
## 2. Hauptsatz

Clausius 1850:

Wärme kann nie **von selbst** einem System niedrigerer Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen.

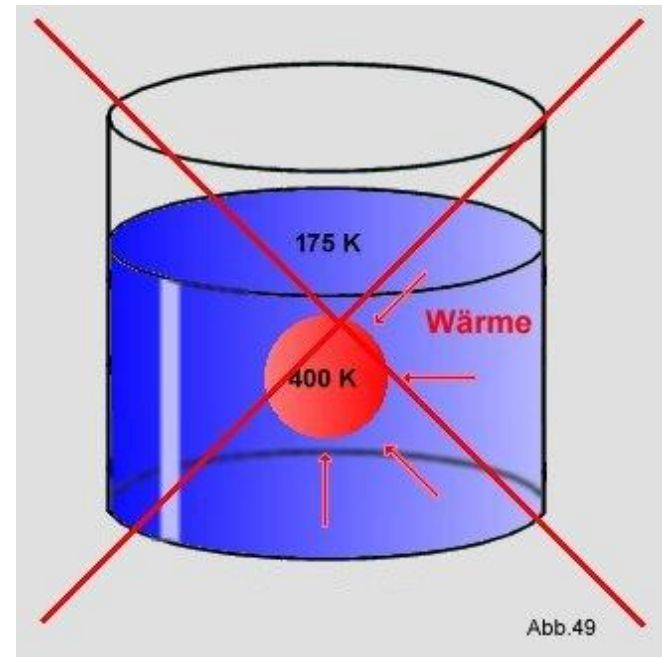
## 2. Hauptsatz

Bringt man z.B. eine 300K warme Kugel in ein Gefäß mit 275K kaltem Wasser, so fließt solange Wärme zum Wasser, bis beide die gleiche Temperatur haben:



## 2. Hauptsatz

Es ist aber noch nie passiert, daß Wärme vom Kälteren zum Wärmeren fließt, was den Temperaturunterschied noch vergrößern würde. Die 300K warme Kugel wird nicht auf 400K aufgeheizt, während das Wasser auf 175 abkühlen müßte:



# 3. Hauptsatz

# 3. Hauptsatz

*ES IST NICHT MÖGLICH, EIN SYSTEM BIS ZUM  
ABSOLUTEN NULLPUNKT ABZUKÜHLEN.*



# **Ende der Präsentation.**

**Es folgt der Supportteil. Die Seiten sind in der Präsentation verknüpft zur Erklärung von Fachbegriffen usw..**

# Quellenverzeichnis

- <http://www.pctheory.uni-ulm.de/didactics/thermodynamik/INHALT/INHALT.HTM>
- <http://www.dick.chemie.uni-regensburg.de/teaching/vorlesungws0405/AllgemChemPC2.pdf>
- <http://library.thinkquest.org/C006011/german/sites/thermo1.php3?v=2>
- <http://www.pa.msu.edu/~bauer/Energie/PDFs/Thermodynamik.pdf>
- <http://www.staff.unibe.ch>
- <http://www.chemlin.de/chemie/thermodynamik.htm>
- <http://elearning.zhaw.ch/moodle/course/view.php?id=1435>
- [www.thermo-bestehen.de](http://www.thermo-bestehen.de)





**Es folgt der Supportteil. Die Seiten sind in der Präsentation  
verknüpft zur Erklärung von Fachbegriffen usw..**



# Support

# Was ist Arbeit?

Abkürzung: W

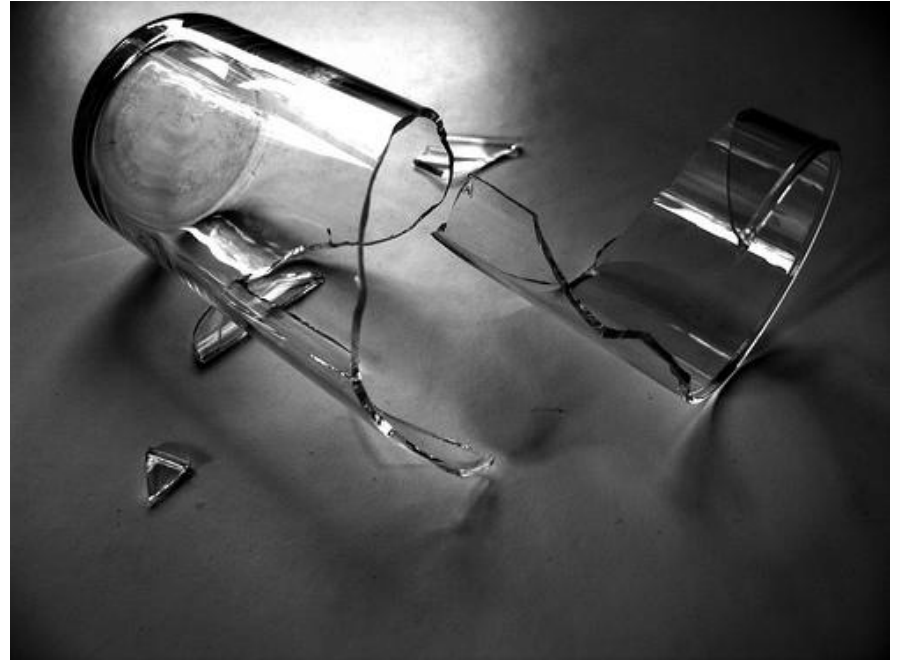
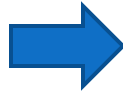
Die **Arbeit W** ist das Produkt aus der **Kraft**, die an einem Körper angreift und dem **Weg**, der in Kraftrichtung zurückgelegt wird.

Die Kraft wird **F** genannt und der Weg **s**:

$$W = F \times s$$



# Irreversibel



**Irreversibel = Nichtumkehrbarkeit**

# Irreversibel

- Ein physikalischer Prozess ist **irreversibel**, wenn er nicht umkehrbar ist. Als Beispiel diene ein Glas, welches von einem Tisch auf den Boden fällt und zerspringt. Nach Rudolf Clausius ist dieser Prozess irreversibel, da er nicht spontan in umgekehrter Richtung ablaufen kann. In der Tat ist noch nie beobachtet worden, wie die Splitter eines Glases sich spontan wieder zusammensetzten und das neu entstandene Glas auf einen Tisch sprang.

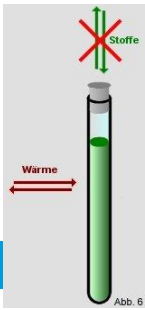
# Wiki = Thermisches Gleichgewicht

- **Thermisches Gleichgewicht** [[Bearbeiten](#)]
- Der Begriff *thermisches Gleichgewicht* wird in zwei verschiedenen Zusammenhängen benutzt.
- Zum einen im oben verwendeten Sinne als Zustand eines einzelnen thermodynamischen Systems: Es befindet sich im thermischen Gleichgewicht, wenn es durch einige wenige makroskopische [Größen](#) beschrieben werden kann und wenn sich diese Größen zeitlich nicht ändern. Eine Flasche Schnaps im Kühlschrank befindet sich im thermischen Gleichgewicht, weil ihr Zustand durch [Masse](#), [Temperatur](#), [Druck](#) und [Alkoholgehalt](#) eindeutig bestimmt ist und (oft) über längere Zeit konstant bleibt. Ein Liter kochendes Spaghettiwasser befindet sich nicht im thermischen Gleichgewicht, weil für die Beschreibung seiner turbulenten Strömungsbewegung sehr viele Informationen erforderlich sind und es deshalb im strengen Sinne kein thermodynamisches System ist.
- Zum anderen als Beziehung zwischen mehreren Systemen: Zwei Körper, die miteinander in thermischem Kontakt stehen, befinden sich miteinander genau dann im thermischen Gleichgewicht, wenn sie die gleichen Temperaturen besitzen. Ist ein System A sowohl mit einem System B als auch mit einem System C im thermischen Gleichgewicht, dann sind auch die Systeme B und C miteinander im thermischen Gleichgewicht. Diese Aussage bildet eine wichtige Grundannahme der Thermodynamik und wird zuweilen als [Nullter Hauptsatz der Thermodynamik](#) bezeichnet.

# Output

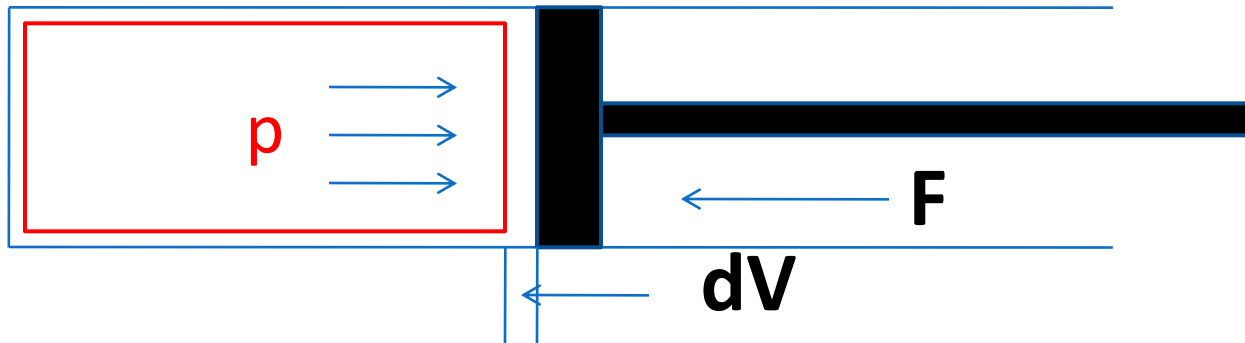
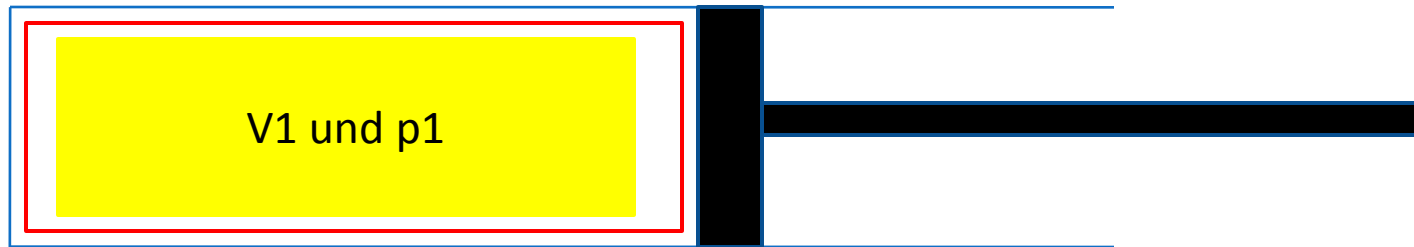
---

- erstmal aussortiertes Material



# Arbeit am geschlossenen System

## Volumenänderungsarbeit





# Berechnung der Volumenänderung

Arbeit = Kraft \* Weg

$$dW = F * ds$$

„F“ ersetzen durch  $F = -p * A$  oben einsetzen

$$dW = -p * A * ds$$

der Ausdruck stellt „ $A * ds$ “ stellt die Volumenänderung  $dv$  dar.

$$dW_v = -p * dv$$

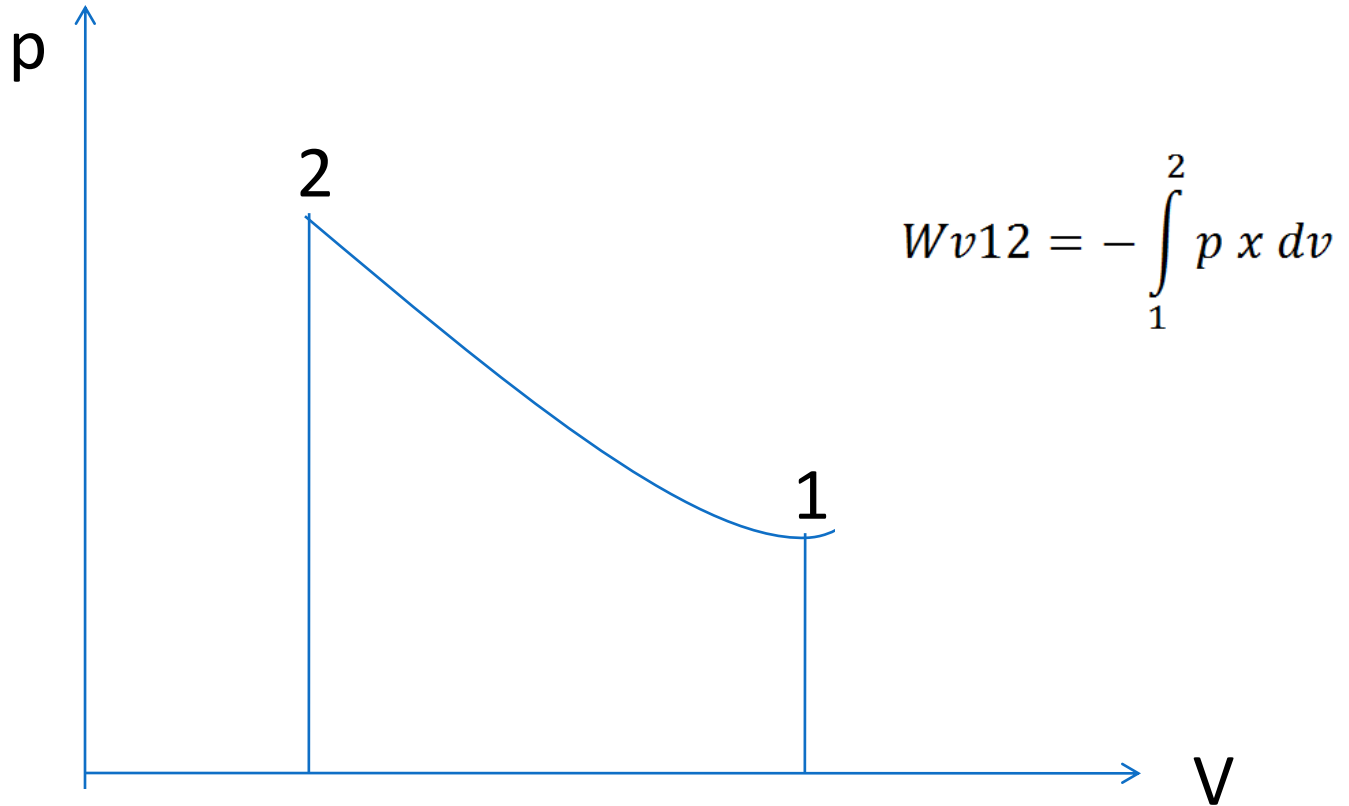
# Die Volumenänderungsarbeit

$$W_{v12} = - \int_1^2 p \, dv \quad \text{geschlossenes System}$$

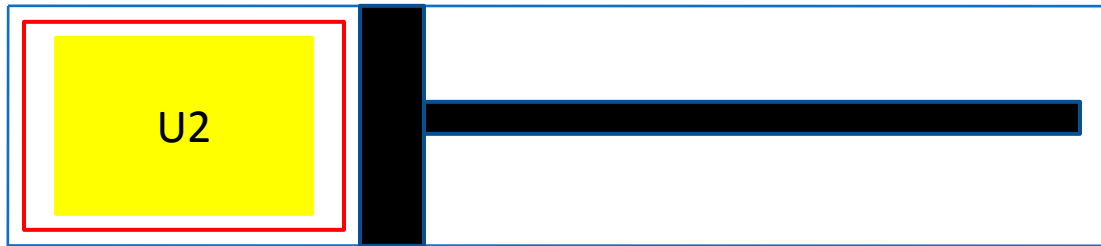
positiv + weil die  
Arbeit zugeführt  
wurde

negativ - weil das  
Volumen verkleinert  
wurde

# Die Volumenänderungsarbeit



# Reibungsarbeit



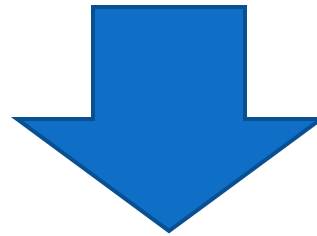
**Reibungsarbeit =  $W_{r12}$**

# Die gesamte Arbeit am System

Volumenänderungsarbeit =  
 $W_{v12}$



Reibungsarbeit =  
 $W_{r12}$



Daraus ergibt sich die gesamte am  
geschlossenen System verrichtete Arbeit =  
 $W_{g12}$

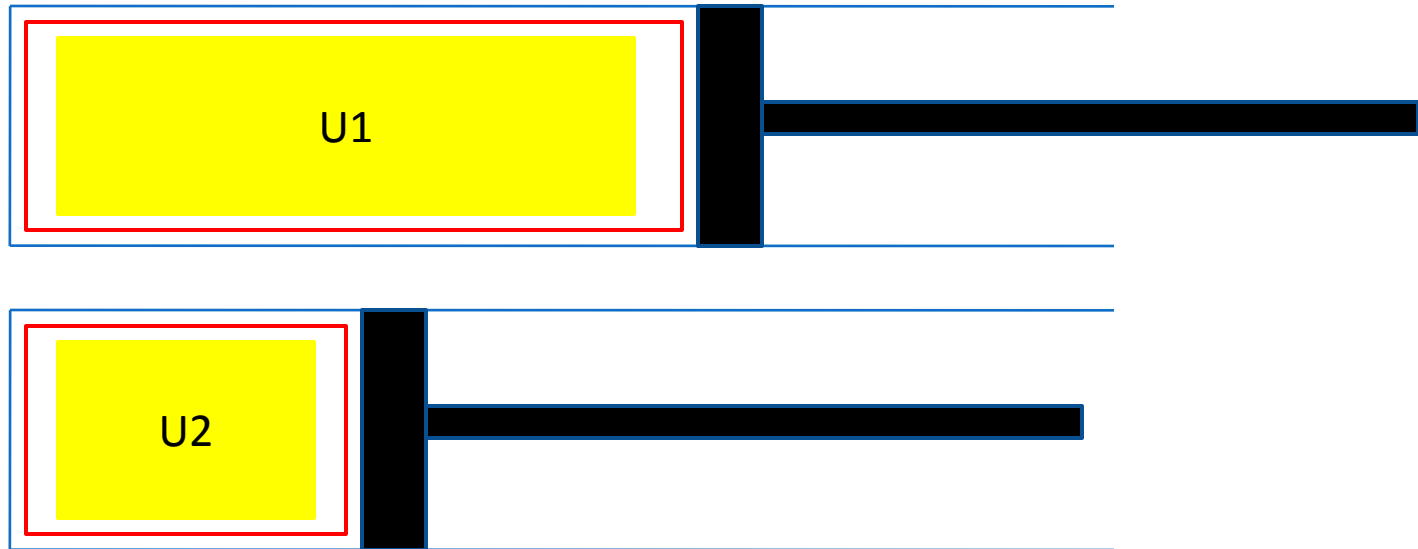
# Die gesamte Arbeit am System

$$W_{g12} = W_{v12} + W_{r12}$$



$$W_{g12} = - \int_1^2 p \, x \, dv + W_{r12}$$

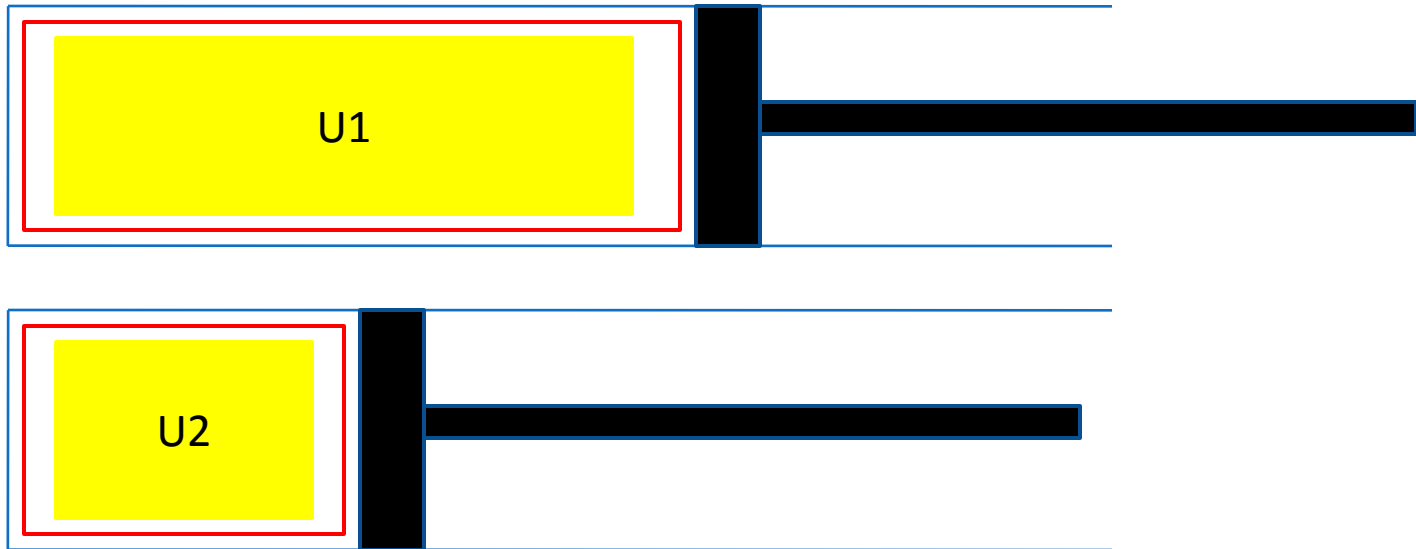
# Die innere Energie



Da Energie nicht verloren gehen kann muss die Volumenänderungsarbeit im Gas gespeichert werden.

Innere Energie ist die im System gespeicherte Energie.

# Die innere Energie



$$W_{g12} = U_2 - U_1$$



# Übersicht was haben wir?

Volumenänderungsarbeit

$$W_{v12} = - \int_1^2 p \, dv$$

Reibungsarbeit  $W_{r12}$

Die gesamte Arbeit am System  $W_{g12} = W_{v12} + W_{r12}$

Die innere Arbeit  $W_{g12} = U_2 - U_1$

# Dazu fügen wir ein:

Verschiebearbeit  $W_{u12}$

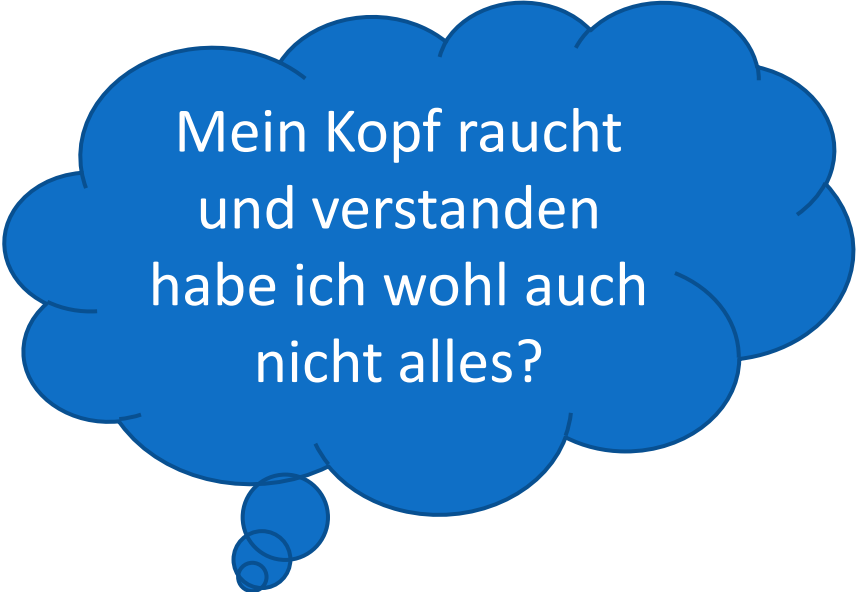
Nutzarbeit  $W_{n12}$

Volumenänderungsarbeit  $W_{v12} = - \int_1^2 p \, dv$

Reibungsarbeit  $W_{r12}$

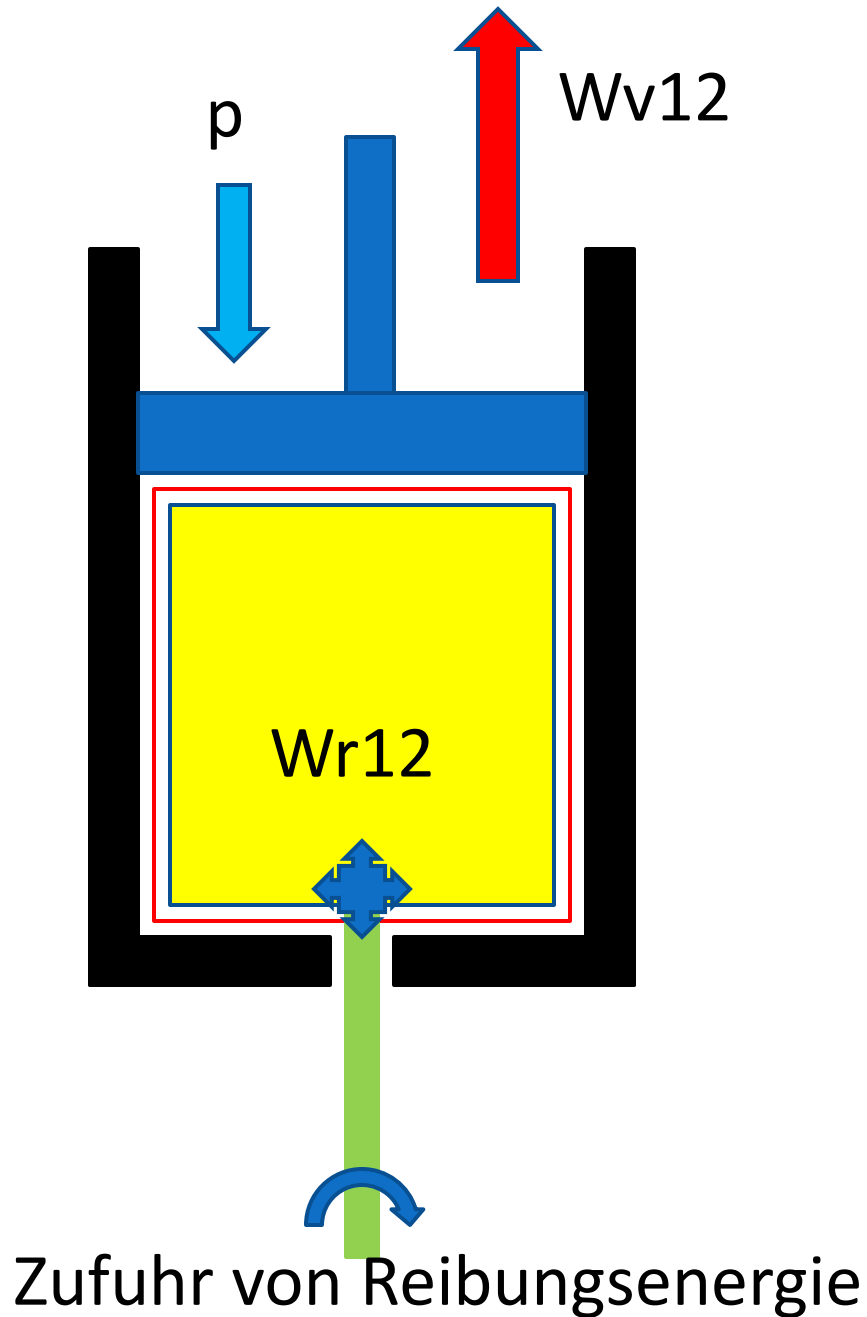
Die gesamte Arbeit am System  $W_{g12} = W_{v12} + W_{r12}$

Die innere Arbeit  $W_{g12} = U_2 - U_1$



Mein Kopf raucht  
und verstanden  
habe ich wohl auch  
nicht alles?

Daher nun ein Beispiel zur  
Anwendung und Verdeutlichung!



$$V1 = 1500\text{l}$$

$$V2 = 500\text{l}$$

$$p = 200\text{kPa (absolut)}$$

$$p_u = 98\text{ kPa}$$

(Umgebungsdruck)

$$W_r = 0,2\text{ kWh}$$

$$T1 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 600^{\circ}\text{C}$$

# 1. Frage Volumenänderungsarbeit

Volumenänderungsarbeit

$$W_{v12} = - \int_1^2 p \times dv$$

$$W_{v12} = - p (V_2 - V_1)$$

$$W_{v12} = -200 * 10^3 * (1500\text{l} - 500\text{l})$$

$$W_{v12} = \underline{\underline{-200\text{kJ}}}$$

( negativ, da abgeführt)

$$V_1 = 1500\text{l}$$

$$V_2 = 500\text{l}$$

$$p = 200\text{kPa (absolut)}$$

$$p_u = 98\text{ kPa (Umgebungsdruck)}$$

$$W_r = 0,2\text{ kWh}$$

$$T_1 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$$

## 2. Frage Änderung der inneren Energie

Die innere Energie  $W_{g12} = U_2 - U_1$

$$U_2 - U_1 = W_{g12} = W_{v12} + W_{r12}$$

$$= -200\text{kJ} + 0,5\text{kWh} * 3,6 * 10^3 \text{ kJ/kWh}$$

$$U_2 = \underline{\underline{+ 520\text{kJ}}}$$

( positiv, da innere Energie steigt)

$$V_1 = 1500\text{l}$$

$$V_2 = 500\text{l}$$

$$p = 200\text{kPa (absolut)}$$

$$p_u = 98 \text{ kPa (Umgebungsdruck)}$$

$$W_r = 0,2 \text{ kWh}$$

$$T_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 600^\circ\text{C}$$

$$W_{v12} = -200\text{kJ}$$

# 3. Frage Verschiebearbeit

$$\text{Verschiebearbeit } W_{u12} = -p_u * (V_2 - V_1)$$

$$W_{u12} = -p_u * (V_2 - V_1)$$

$$W_{u12} = -98 * 10^3 \text{ Pa} * (1500\text{l} - 500\text{l})$$

$$W_{u12} = \underline{\underline{-98 \text{ kJ}}}$$

( negativ, da abgeführt)

$$V_1 = 1500\text{l}$$

$$V_2 = 500\text{l}$$

$$p = 200\text{kPa (absolut)}$$

$$p_u = 98 \text{ kPa (Umgebungsdruck)}$$

$$W_r = 0,2 \text{ kWh}$$

$$T_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 600^\circ\text{C}$$

$$W_{v12} = -200\text{kJ}$$

$$W_{g12} = +520\text{kJ}$$

# 4. Frage Nutzarbeit an der Kolbenstange

$$\text{Nutzarbeit } W_{n12} = W_{v12} - W_{u12}$$

$$W_{n12} = -W_{v12} - W_{u12}$$

$$W_{n12} = -200 \text{ kJ} - (-98 \text{ kJ})$$

$$W_{n12} = \underline{\underline{-102 \text{ kJ}}}$$

( negativ, da abgeföhrt)

$$V_1 = 1500 \text{ l}$$

$$V_2 = 500 \text{ l}$$

$$p = 200 \text{ kPa (absolut)}$$

$$p_u = 98 \text{ kPa (Umgebungsdruck)}$$

$$W_r = 0,2 \text{ kWh}$$

$$T_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_{v12} = -200 \text{ kJ}$$

$$W_{g12} = +520 \text{ kJ}$$

$$W_{u12} = -98 \text{ kJ}$$

